Chinese Agron. J. 8 : 29-38 (1998)
Chinese Society of Agronomy © 1998

熱紅外線輻射影像檢測水稻生育期植冠溫度之變化

蘇慕容　楊純明*

臺灣省農業試驗所農藝系作物逆境研究室

摘要： 作物植冠溫度同時受到氣象與土壤環境雙重影響，在土壤不缺水狀況下，以氣溫、日照、濕度、及風速為主要影響之氣象因子，而由植冠溫度的變化可據以評估作物生長是否正常進行　本文研究於1996年在臺灣省農業試驗所農場以攜帶式熱紅外線影像輻射儀(thermal infrared imaging radiometer)進行兩期稻作植冠（被）溫度之測定，以探討水稻(*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67)生育過程植冠溫度之變化及分佈情形，並比較植冠溫度與當時氣溫之關係　熱紅外線影像輻射儀採用電磁波長8-12 μm的波長範圍檢測，結果顯示分蘗期與穗形成期植株溫度分佈均較集中，表示稻株植冠各部位溫度差異小；成熟期植冠溫度分佈則較為分散，因此影像具有較大對比，而以稻穗部位溫度較劍葉高。又此三段不同生育時期的植冠溫度皆小於氣溫，顯示蒸散作用予稻株的散熱功能。上述結果在兩期稻作表現頗似　試驗另發現，在不同氣溫下與植冠溫度的差值並非等距；在較高氣溫時，兩者的差值較小，證明稻株藉著旺盛蒸散作用調節體溫，以維持其正常生理反應。

關鍵詞： 熱紅外線、熱影像、水稻、植冠溫度、氣溫

Measurement of rice canopy temperature by thermal infrared imagery

Muh-Rong Su and Chwen-Ming Yang*

Crop Stress Research Lab., Department of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute, Taiwan,ROC

Abstract. Changes of canopy temperature of a crop are governed by both microclimate and soil environment. Under normal growth conditions without moisture restriction, ambient temperature, solar radiation, humidity, and wind speed are major climatic factors affecting canopy temperature. Field experiments were conducted at Taiwan Agricultural Research Institute Experimental Farm to measure canopy temperatures of rice crops, using a thermal infrared imaging radiometer at 8-12 μm wavelength region, in 1996. Canopy temperature's variation and distribution during growing periods and their differences to ambient temperatures were analyzed. It was shown that canopy temperatures were centered near the means at tillering and panicle formation stages but were scattered during the maturing in both croping seasons. Results indicated a greater variation of canopy temperatures occurring in the ma-

turing stage. The better contrast of thermal images was resulted from a higher temperature of panicles than that of flag leaves. Canopy temperatures were found lower than ambient temperatures throughout the growth phases in both seasons, indicating a proper heat-dissipating function of transpiration in rice crops under water-unlimited condition. Temperature differences between canopy and ambient air changed with time, the higher the ambient temperature the lower the difference. It implies that rice may adjust transpiration rate to ameliorate temperature fluctuation in the surroundings for maintaining normal physiological processes.

Keywords: Thermal infrared, Thermal imagery, Rice, Canopy temperature, Ambient temperature.

前　言

作物生長發育通常在一定的溫度條件（範圍）下進行及完成，許多重要生理活動與生化反應，如光合作用、呼吸作用、離子吸收、蒸散作用及酵素作用等均依賴適宜的溫度環境。由於外在環境及植物本身內在因素的影響，植冠溫度並非恆定，其改變原因可由能量平衡模式(Rn + H + G + λE = 0)推知，其中Rn為輻射能交換平衡（淨輻射）、H為對流造成的感熱、G為傳導熱流、E為水分蒸發之潛熱。外在環境除了當時氣溫外，日射強度、風速、水蒸氣壓差（濕度）等也會影響植冠溫度(Jackson *et al.*, 1981)，內在植物生理因素如蒸散作用及氣孔阻力，此外植物的幾何結構、栽植密度、植冠空間分布等構成植冠溫度的易變性及複雜性(Boissard *et al.*, 1990)。

由普朗克理論(Planck's Law)，溫度T (°K)之完全黑體（放射率為1）所放射(emit)的熱輻射強度對波長λ有一定的關係，據此Stefan-Boltzmann導出輻射能與絕對溫度(°K)的四次方成正比之公式，亦即溫度在絕對零度以上的物體會放出輻射能。由於植物體為一自然灰體，放射率一般在0.97-0.98附近(Fuch, 1990; Sobrino and Caselles, 1990)，應用此一理論所發展之紅外線溫度計測，由測定植體的輻射能來反推估植冠溫度，具有遠距離感測、非接觸式及迅速即時之特點(Fuch and Tanner, 1966; Blad and Rosenberg, 1976)。

近年來隨著科技的進展已進一步發展出可以同時測定點、線、面溫的紅外線熱像裝置（如熱紅外線影像輻射儀），其原理為測定物體表面輻射能量與周邊物體入射於表面而反射的能量總和，亦即射度(radiosity)，經輸入物體之放射率，再據以計算物體表面溫度。而紅外線熱像顯示的影像是把有關射度的二次元影像視覺化，依相對輻射度及溫度呈現被測物之熱影像(Operator's Manual, 1992)。最近數年熱紅外線輻射的測量儀器發展更加快速，原來多種架設於衛星及航空飛行器上精密熱紅外線檢測儀器，也逐漸被應用於地面觀測研究。這些地面觀測裝置自大型載台至手握輕便攜帶式熱影像輻射儀，使用漸趨普遍與簡易，而且利用這些儀器偵測作物生長及植冠溫度特性的研究也獲得相當的進展(Blad and Rosenberg, 1976; Baradas *et al.*, 1976; Jackson *et al.*, 1977; Inoue, 1990)，尤其在於檢測作物水分利用之研究已經獲得成效。稍早Jackson *et al.* (1981)以紅外線輻射原理測定植冠溫度，並配合乾濕球溫度計估計淨輻射，發展出由能量平衡模式計算之作物水分逆境指數(crop water stress index)。Inoue *et al.* (1994)以遙測溫度的方法估計

與植冠蒸散有關之土壤水分狀況，Thunnissen and Nieuwenhuis (1990)利用瞬時飛行之紅外線熱像之測定數值估算全日內24小時植物蒸發散量，均獲得相當成效。Clarke (1997)則配合紅外線熱像來檢測作物乾旱逆境，使航測熱像之應用得到落實。

本文研究乃利用熱紅外線影像輻射儀地面偵測田間一、二期稻作生育過程植冠溫度之變化與溫度分佈情形，並比較植冠溫度與當時氣溫的差異，以瞭解兩者的關係，建立水稻生育期間植冠溫度之基本資料及未來逆境研究之探討。

材料與方法

本研究於1996年在臺灣省農業試驗所農場（東經120°42'、北緯24°02'，及海拔高度85m）進行田間試驗，地面遙測兩期稻作植冠之熱紅外線影像。田間設置三重複試區，各區面積12m × 18m，水稻品種選用當年臺灣地區栽培面積最廣的臺農67號(*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67)。一、二稻期作分別於該年2月29日及8月5日插秧，收穫日期分別爲7月10日及11月18日，生育日數兩期稻作則分別爲132天及106天。試驗期間栽培管理方法採用慣行法，南北向機械插秧，行株距0.26 m × 0.20 m，插秧後兩週及四週分別施用臺肥39號複合肥料及硫酸銨，施用量各爲400 kg ha^{-1}；幼穗形成前再施用尿素200 kg ha^{-1}。雜草管理係於插秧後施用丁拉殺丹8%混合粒劑(5%, S-(4-chlorobenzyl)-N, N-diethylthiocarbamate; 3%, 2-chloro-2,6-diethyl-N-(butoxymethyl)acetanilide)，施用量30 kg ha^{-1}，插秧後4-6週再行人工除草一次。

稻株插秧三週後開始定期進行熱紅外線輻射影像偵（檢）測，選擇較晴朗無風的天氣，當地上午10:30-12:00期間地面遙測水稻植冠熱像。偵測儀器爲攜帶式熱紅外線影像輻射儀(Model 760, Inframetrics Inc., Massachusetts, USA)，包含掃描器（標準一倍鏡頭）、控制主機元件、連結光纖纜、及12伏特蓄電池等，將上述儀器設備攜帶至試驗田區，以俯角約30度對準標的水稻植冠（被），涵蓋面積約11m^2，測定即時植冠輻射溫度（熱像）。田間測定前先測量環境背景溫度(background temperature)輸入儀器之測量結構設定頁中，同時設定放射率(emissivity)爲0.98，溫度間距10℃，外界光學穿透(external optics transmission)爲1（假設無顯著干擾因子影響光輻射穿透）。在程序介量設定頁中則設定爲單一影像，溫度單位爲°C，其餘參數依儀器內原始設值。

在掃描熱影像圖譜後立即儲存於主控制器的雙面高密度磁片（3.5吋）上，成爲高解析度的熱像圖像檔，該圖像檔再經由適用於個人電腦上的ThermaGRAM (Thermoteknix System Ltd., Cambridge, England)電腦軟體予以分析。此一軟體具有顯示及計算圖像之點、線、面溫度與其頻度分佈及剖面溫度分佈等功能，同時可計算熱像任一大小視窗溫度的平均値、最大値、最小値、標準偏差(standard deviation)及歪度(skew)，而達到比較與量化的效果。爲瞭解植冠溫度分佈與差異，以整個熱像視窗的平均溫度爲中心點，選擇5°C爲範圍（往低溫、高溫方向各2.5°C），再分割爲10間隔（每1間隔代表0.5°C）以比較。並同時採用距離試區100 m之農試所一級農業氣象站之檢測時段氣溫測値，以比較與分析植冠溫度與氣溫之關係。

結果與討論

圖1係1996年一期作水稻三段不同生育期植冠之典型熱紅外線輻射影像及視窗內溫度分佈，其中上方影像圖形（熱像）標示了測定日期及生育日數，分別代表分蘗期(48 days)、穗形成期(77 days)

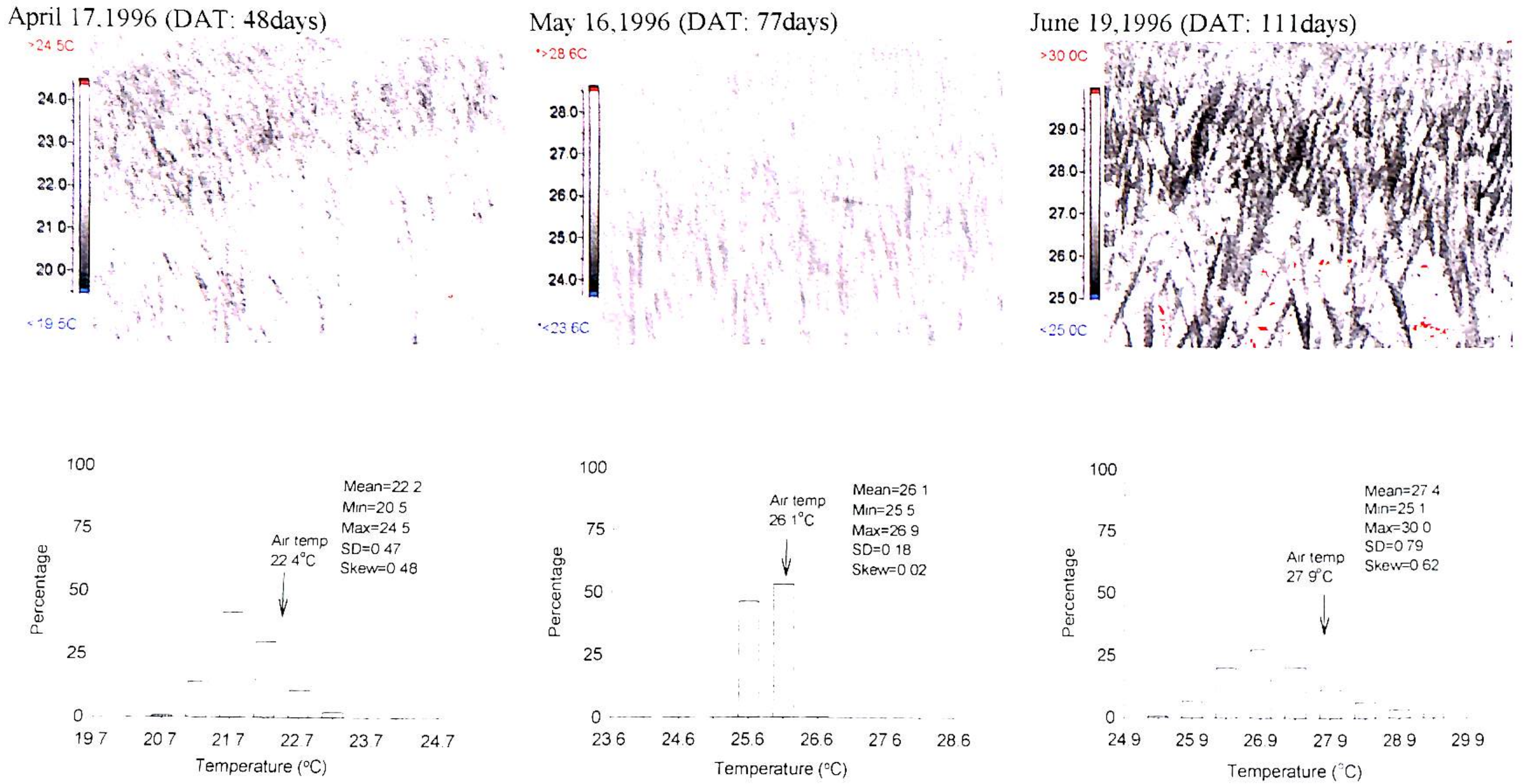

Fig. 1. Thermograms and their temperature distributions of rice canopy measured at tillering (48 days), panicle formation (77 days), and maturing (111 days) stages in the first crop of 1996.

及成熟期(111 days)等三不同生育階段，明暗對比代表了溫度高低。下方柱狀圖形乃上方植冠熱像分別對應之視窗內溫度分佈，此一溫度分佈圖標示了視窗植冠溫度的平均值、最大值、最小值、標準偏差與歪度，箭頭所指部分爲測定當時氣溫。就熱像而言，分蘗期與穗形成期之影像對比較不明顯，成熟期則對比較佳；由視窗植冠溫度分佈來看，分蘗期與穗形成期植冠溫度分佈較集中（SD較小），顯示稻株不同部位溫度差異較小，而成熟期植株溫度分佈較分散（SD較大），顯示稻株不同部位溫度差異較大，其中尤以稻穗部分的溫度較劍葉爲高，影像對比明顯。

表1爲一期稻作不同生育日數所偵測植冠熱像之視窗溫度的分佈，顯示在生育初期（尤其在營養生長期）植冠溫度變異較小，多集中於中心溫度附近。在開花期以後（大約95天），植冠溫度變異加大，熱像對比增高。表1數字趨勢與圖1結果相吻合，顯見植冠溫度分佈隨生育進展改變，稻株之分蘗與葉片的增減使水稻族群幾何結構與空間分佈隨時間產生變化，植株地上部位的交疊遮蔽使得植冠溫度更形多樣，因此可以想見當植株建立後植冠溫度變異自然增大。表2之二期稻作亦呈現類似結果，由於本試驗熱像量測係選擇晴朗無風天氣進行，顯然除了外界環境的影響之外，生育進展造成族群幾何結構與空間分佈的改變也將影響植冠溫度分佈。

圖1又顯示，水稻三個不同生育時期所測定的平均植冠溫度均低於當時氣溫，表示當時植體自身蒸散作用的散熱功能足以降低體溫，維持植冠溫度低於氣溫水準。圖2之二期稻作熱像分析結果與一期作類似，證明只要提供充分的水源使蒸散作用順利進行，無論期作稻株全生育過程俱能維持適當的體溫。惟如前述植冠各部位幾何結構不一，因此產生不同的溫度分佈，而以接近視窗平均溫度者比例較高。然三段不同生育時期的植冠溫度與氣溫之差距略有不同，此現象是否與生育階段之生理代謝直接相關，則待進一步探討。

經將每一測定視窗植冠溫度資料統計分析（表

Table 1. Proportions of temperature distribution of rice canopy in the thermograms measured after transplanting in the first crop of 1996.

Temperature range	Days after transplanting										
	48	77	81	96	97	100	104	106	111	131	AVE
	----- proportion, % -----										
1 (low)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0.1	2.0	0.8	1.1	0.8	0	0.5
4	1.9	0	0	9.0	5.3	18.6	15.9	12.1	14.6	6.2	8.4
5	49.9	31.7	56.6	45.1	40.4	34.9	38.4	35.1	40.4	50.6	42.3
6	45.5	68.3	43.4	34.5	45.2	28.2	30.4	35.4	31.3	35.9	39.8
7	2.8	0	0	10.5	8.6	12.9	12.4	13.6	10.7	7.0	7.8
8	0	0	0	0.8	0.4	3.0	1.9	2.7	2.0	0.3	1.1
9	0	0	0	0	0	0.4	0.2	0.1	0.1	0	0.1
10 (high)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lower limit(°C)	19.8	23.6	21.9	25.7	24.8	24.7	25.2	26.0	25.4	27.7	
Upper limit(°C)	24.3	28.1	26.4	30.2	29.3	29.2	29.7	30.5	29.9	31.7	

Table 2. Proportions of temperature distribution of rice canopy in the thermograms measured after transplanting in the second crop of 1996.

Temperature range	Days after transplanting							AVE
	48	57	64	73	85	93	101	
	- - - - - proportion, % - - - - -							
1 (low)	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.4	0.2	0.4	0	0.1
4	4.2	2.4	9.0	10.1	9.2	10.0	0.2	5.4
5	49.4	53.6	45.1	39.1	44.1	40.9	59.4	48.1
6	42.5	40.9	34.5	38.6	39.5	35.8	40.4	40.6
7	3.8	3.2	10.5	11.0	6.6	11.0	0	5.4
8	0	0	0.8	0.8	0.4	1.6	0	0.4
9	0	0	0	0	0	0.2	0	0
10 (high)	0	0	0	0	0	0	0	0
Lower limit(°C)	27.1	23.1	25.7	23.3	23.2	24.2	19.9	
Upper limit(°C)	31.6	27.6	30.2	27.8	27.7	28.7	24.4	

3），更清楚呈現水稻生育期間植冠溫度的變化，發現兩期稻作生育初期視窗植冠溫度分佈範圍確較抽穗至成熟期爲小（由最大値、最小値及標準偏差來看），符合前述圖1及圖2熱像結果。顯示後者植冠具有較廣大溫度範圍，如熱像（圖1及圖2）所示主要爲穗部與葉片溫度差異所引起，直至接近收穫時期（一、二期稻作分別爲131天與101天）時，視窗植冠溫度分佈範圍再度縮小，可能係植株老化、老葉較多、族群內差異減少所致，尙需深入探究。

將本試驗測得水稻植冠溫度與氣溫進行分析比較（圖3A），再次顯示稻作全生育期植冠溫度概低於氣溫。而且在本試驗範圍內，隨氣溫上升，植冠溫度與氣溫的差距加大（斜率 0.71）。顯然在較高氣溫時，水稻植冠溫度並不會以相同幅度升高，而係藉由蒸散作用調節水稻的體溫，以維持水稻正常的生理代謝功能。由氣溫與植冠溫度之差値 (Ta−Tc=Δt)與氣溫(Ta)比較（圖3B），當氣溫上升則Δt也跟著升高，驗證了水稻自身具有體溫調節作用，使植冠溫度維持適度穩定。

本試驗在1996年一、二期稻作期間測定水稻植冠熱紅外線輻射影像，雖選擇較晴朗無風天氣量測，熱像清晰程度仍受到當時不同天候條件之影響。根據上述能量平衡模式推測，外在氣溫、光輻射、風速、水蒸氣壓差（濕度）等氣象因子均可能影響植冠溫度，並同時左右輻射影像之對比(Boissard *et al*. 1990)。惟本試驗亦進一步發現生育時期對植冠溫度的可能效應，値得未來加強植冠幾何結構之影響研究與探討。

誌謝：臺灣省農業試驗所研究報告第1903號。本文研究承臺灣省政府農林廳中美農業合作計畫、行政院農委會86科技-1.3-糧-16計畫、及中央氣象局CWB87-2M-09計畫等經費經費支持，謹此致謝。

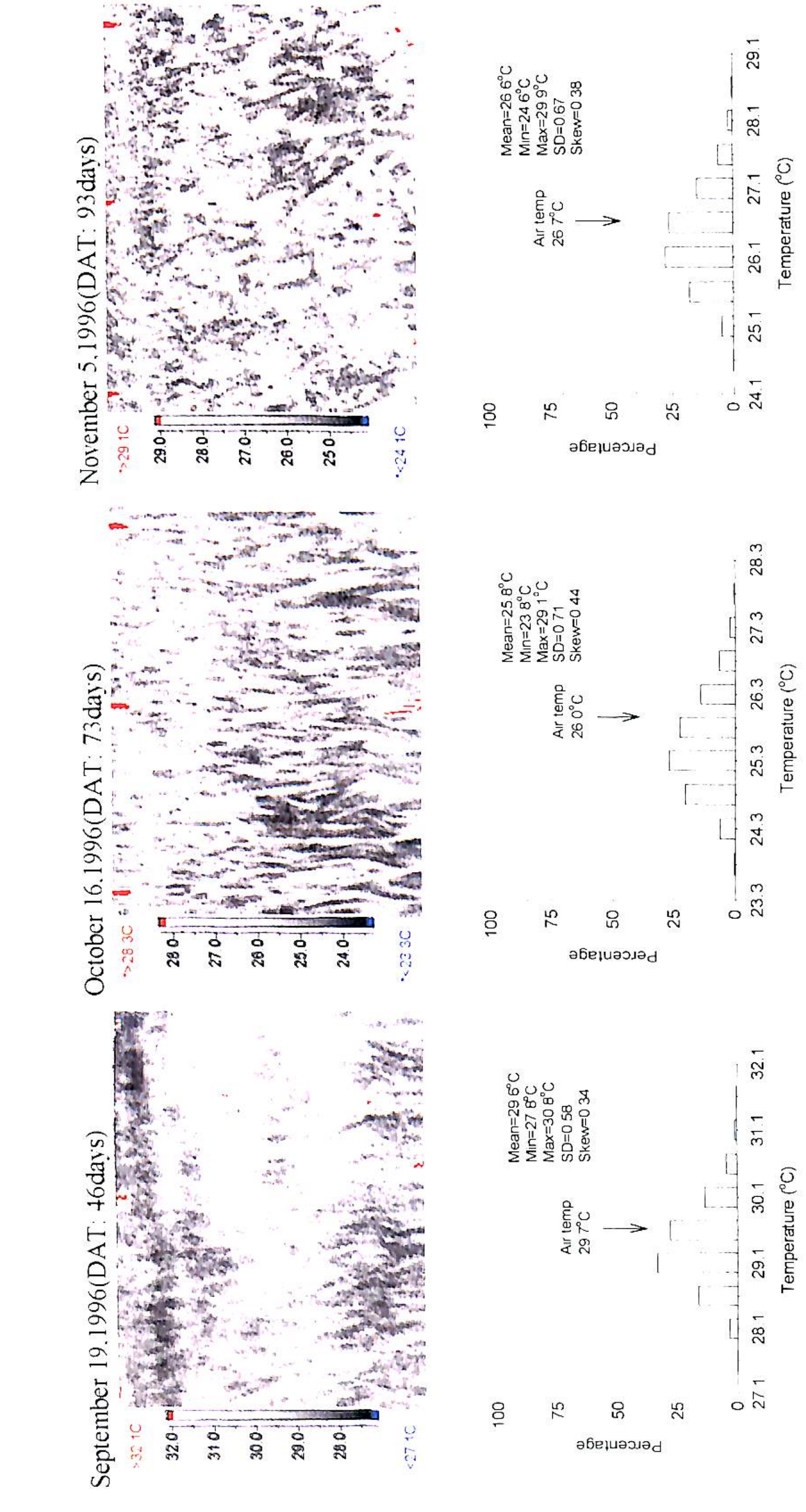

Fig. 2. Thermograms and their temperature distributions of rice canopy measured at tillering (46 days), panicle formation (73 days), and maturing (93 days) stages in the second crop of 1996.

Table 3. Temperature variation of rice canopy in the thermograms measured after transplanting in the first and the second crops of 1996.

DAT[a]	Minimum	Mean	Maximum	Max - Min	S.D.	Skew
			---- C----			
1st crop						
48	21.3	22.3	23.9	2.6	0.25	0.22
77	25.8	26.1	26.6	0.8	0.10	-0.12
81	23.9	24.4	25.0	1.1	0.15	0.23
96	27.1	28.2	30.3	3.2	0.39	0.38
97	26.1	27.3	29.0	2.9	0.35	0.09
100	25.8	27.2	30.5	4.7	0.53	0.34
104	26.2	27.7	29.8	3.6	0.47	0.37
106	27.0	28.5	30.4	3.4	0.48	0.17
111	26.5	27.9	30.0	3.5	0.46	0.37
131	28.6	29.7	31.1	2.5	0.34	0.40
2nd crop						
46	28.5	29.6	30.8	2.3	0.29	0.13
57	24.7	25.6	26.9	2.2	0.27	0.41
64	25.2	26.1	27.1	1.9	0.24	0.07
73	24.3	25.8	28.0	3.7	0.41	0.14
85	24.4	25.7	27.4	3.0	0.36	0.17
93	25.2	26.7	28.8	3.6	0.43	0.40
101	21.7	22.4	23.0	1.3	0.16	0

[a] Days after transplanting

引用文獻

Baradas, M. W., Blad, B. L. and Rosenberg, N. J. (1976) Reflectant induced modification of soybean canopy radiation balance. 4. Leaf and canopy temperature. *Agron. J.* 68:843-848.

Blad, B. L. and Rosenberg, N. J. (1976) Measurement of crop temperature by leaf thermocouple, infrared thermometry and remotely sensed thermal imagery. *Agron. J.* 68:635-641.

Boissard, P., Guyot, G. and Jackson, R. D. (1990) Factors affacting the radiative temperature of a vegetative canopy. pp.45-72. In: Applications of Remote Sensing in Agriculture. (eds. Steven, M. D. and Clark, J. A.) Cambridge, England.

Clarke, T. R. (1997) An empirical approach for detecting crop water stress using multispectral airborne sensors. *HortTechnology* 7(1):9-16.

Fuchs, M. (1990) Canopy thermal infrared observations. pp.323-333. In: Instrumentation for Studying Vegetation Canopies for Remote Sensing in Optical and Infrared Regions. (eds. Goel, N. S. and Norman J. M.) Harwood Academic, U. K.

Fuchs, M. and Tanner, C. B.(1966) Infrared thermometry of vegetation. *Agron. J.* 58:597-601.

Inoue, Y. (1990) Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. *Jpn. J. Crop Sci.* 59:762-768.

Inoue, Y., Sakuratani, T., Shibayama, M. and Morinaga, S. (1994) Remote and real-time sensing of canopy transpiration and conductance comparison of remote and stem flow gauge method in soybean canopies as affected by soil water status. *Jpn. J. Crop Sci.*

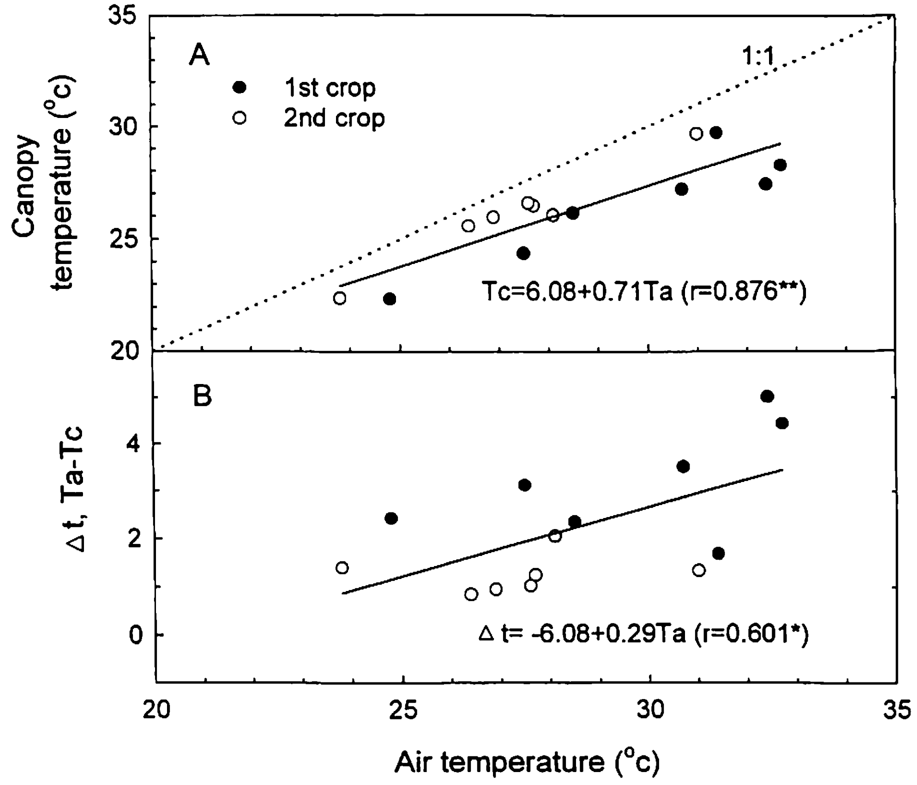

Fig. 3. Changes of (A) canopy temperature and (B) air-canopy temperature differences in response to air temperature in rice crops grown in 1996.

63:664-670.

Jackson, R. D., Idso, S. B. Reginato, R. J. and Pinter, P. J. Jr. (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17(4):1133-1138.

Jackson, R. D., Reginato, R. J. and Idso, S. B. (1977) Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.* 13(3):651-656.

Operator's Manual. 1992. Inframetrics Model 760 Infrared Imaging Radiometer. Inframetrics Inc., Massachusetts, USA. 120pp.

Sobrino, J. A. and Caselles, V. (1990) Thermal infrared radiance model for interpreting the directional radiometric temperature of a vegetative surface. *Remote Sens. Environ.* 33:193-199.

Thunnissen, H. A. M. and Nieuwenhuis, G. J. A. (1990) A simplified method to estimate regional 24-h evapotranspiration from thermal infrared data. *Remote Sens. Environ.* 31:211-225.

收稿日期：86年11月18日

接受刊登日期：87年3月11 日

編　輯：盧虎生

通訊作者：楊純明（電話：04-3302301轉135；傳眞：04-3302806，04-3338162）